

Research Paper

An Evaluation of Techniques for Outlier Detection and Missing Values Imputation of Hydrological Data Series in the Zarrineh-Roud Basin, Lake Urmia

Edith Eishoei¹, Mirhassan Miryaghoubzadeh², Mahdi Erfanian³,
Reza Mahboobi Esfajani⁴ and Marco Mancini⁵

1- Ph.D, Department of Watershed Management Engineering, Natural Resources Faculty, Urmia, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Natural Resources Faculty, Urmia University, Urmia, Iran, (Corresponding author: m.miryaghoubzadeh@urmia.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Natural Resources Faculty, Urmia University, Urmia, Iran

4- Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

5- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy

Received: 02 February, 2025

Revised: 02 April, 2025

Accepted: 11 May, 2025

Extended Abstract

Background: Accurate river flow measurements are essential for effective water resource management, flood mitigation, river conservation and restoration, and stream rehabilitation. The majority of flood control and design flow strategies in river management and restoration initiatives are derived from hydrological and hydraulic analyses based on observed river flow. Hydrological investigations are fundamentally reliant on observational statistical data, which frequently contain multiple errors. Outliers, which are defined as data points deviating significantly from the norm, can introduce substantial calculation errors. Outlier detection techniques include supervised, semi-supervised, and unsupervised approaches, which may include distribution-based, clustering-based, and density-based methods. These errors can arise from computational issues, misreporting, sampling inaccuracies, and human or instrumental errors, leading to problems such as unrecorded data, incorrect values, equipment failure or loss, and the misidentification of outliers as missing data. Consequently, the estimation and assessment of these data are essential for their application in models, and to mitigate mistakes, preprocessing must be performed before their utilization. Preprocessing methods prepare data series for computations, such as classification, prediction, and estimation, and include the elimination of missing data, removal of outliers, imputation of missing values, and data normalization.

Method: This study utilized flow and rainfall data from six hydrometeorological stations and 16 rain stations to identify outliers and impute missing or incomplete hydrological values. The data, obtained from the Zarrineh-roud basin, were implemented using R software. The Zarrineh River watershed constitutes the largest watershed of Lake Urmia. Normalization tests, including the Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov tests, were used to normalize the data, and the findings indicated that the data did not conform to a normal distribution. Subsequent to data normalization, outlier detection was executed using approaches including boxplot, z-score, histogram, chi-square, mean and standard deviation, and median techniques. Values exceeding the established maximum were removed. Missing values were imputed using K-Nearest Neighbor (KNN), Lasso regression, and Bayesian linear regression. Lasso regression is a regularization technique designed to diminish model complexity and avoid overfitting. Bayesian linear regression is a statistical analysis method that integrates linear regression with Bayesian techniques. The KNN algorithm is a sample-based method related to nonparametric models and supervised learning classification. Cross-validation was used to assess the accuracy of the imputation methods, with RMSE and R^2 serving as performance metrics.

Result: According to the results, P-values at all six study stations were less than 0.05. The cross-validation approach was used to assess the accuracy and precision of the KNN, Lasso regression, and linear Bayesian regression techniques. RMSE values near zero and R^2 values above 0.7 across all stations indicated that KNN was a robust and accurate method for missing value imputation. It provides significantly more accurate and reliable outcomes without reshaping the data series trend than Lasso regression and Bayesian linear regression. Outliers were removed from the Jan-Agha and Darreh Pandedan stations during normalization. Histogram analysis revealed skewness



and outliers at the Jan-Agha, Sariqamish, and Pol-Anyan stations, indicating a heterogeneous and non-normally distributed dataset. Outliers were identified and removed following normalization. The Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov tests yielded p-values significantly below 0.05 after normalization, confirming a normal distribution. This suggests that the normalization process and outlier removal were executed with precision, indicating the significant detection and estimation of outliers. The Rosner test established the upper limit for each data series across two successive tests, classifying values beyond this limit as outliers. The consistency of the probability density functions between the observed and imputed values using the KNN method indicates an adequate alignment of the two probability density functions. This method has proved effective in imputing the maximum, average, and minimum values relative to the other two methods at the studied stations.

Conclusion: The results of this investigation indicate that the boxplot identifies data values outside the lines as outliers, leading to a substantial number of outliers being detected compared to the other methods. Consequently, this method is considered unsuitable for outlier detection in hydrological data. KNN proved highly effective for missing data imputation compared to Lasso regression and Bayesian linear regression. This study involved normalizing the data series, calculating the values of outliers, and employing the KNN algorithm to identify incomplete or unmeasured and missing values. In datasets exhibiting little variation, KNN has high accuracy and is regarded as one of the most valuable and dependable techniques for attributing and imputing missing values. Cross-validation confirmed the performance of KNN, Lasso regression, and Bayesian linear regression. KNN achieved R^2 values above 0.7 and RMSE values close to zero. KNN outperformed the other two methods in estimating missing values in continuous and discontinuous flow data. This effectiveness is attributed to KNN's ability to identify optimal nearest neighbor values, making it suitable for accurate predictions, even during low flow periods. The precision of KNN stems from its computational simplicity and high efficacy in calculating and imputing missing values while preserving the integrity of the data series.

Keywords: Bayesian linear regression, K Nearest Neighbor, Lasso regression, Shapiro-Wilk test, Zarrineh-roud basin

How to Cite This Article: Eishoei, E., Miryaghoubzadeh, M., Erfanian, M., Mahboobi Esfanjani, R., & Mancini, M. (2025). An Evaluation of Techniques for Outlier Detection and Missing Values Imputation of Hydrological Data Series in the Zarrineh-Roud Basin, Lake Urmia. *J Watershed Manage Res*, 16(2), 19-34. DOI: 10.61882/jwmr.2025.1310



مقاله پژوهشی

ارزیابی روش های تشخیص و بازسازی مقادیر پرت و گمشده در سری داده های هیدرولوژیکی حوزه آبخیز زرينه رود، دریاچه ارومیه

ادیت عیشویی^۱، میرحسن میریعقوبزاده^۲، مهدی عرفانیان^۳، رضا محبوبی اسفنجانی^۴ و مارکو مانچینی^۵

- ۱- دانش آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 ۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (نویسنده مسوول: m.miryaghoubzadeh@urmia.ac.ir)
 ۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 ۴- استاد گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
 ۵- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی محیط زیست و عمران، دانشگاه پلی تکنیک میلان، میلان، ایتالیا

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۴
صفحه: ۱۹ تا ۳۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: اندازه گیری های جریان رودخانه و داده های آن در مدیریت منابع آب، کنترل سیل، حفاظت و احیای رودخانه، بازسازی جریان اهمیت بسزایی دارند. اکثر طرح های کنترل سیل و دبی طراحی در پروژه های مدیریت و احیای رودخانه توسط تحلیل های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مبتنی بر دبی مشاهداتی حوزه تخمین زده می شوند. پایه مطالعات هیدرولوژیکی به داده های آماری مشاهداتی وابسته است و این داده ها در اغلب موارد دارای خطاهای متعدد هستند. داده پرت داده ای است که از نرم طبیعی فاصله گرفته است و باعث بروز خطا در محاسبات می شود. روش های تشخیص داده های پرت شامل روش های نظارت شده، نیمه نظارت شده و نظارت نشده هستند و برخی روش های مبتنی بر توزیع، مبتنی بر خوشه بندی و مبتنی بر چگالی را شامل می شوند. به دلیل خطای محاسباتی، مقادیر صحیح خاص، گزارش اشتباه و یا خطای نمونه برداری و همچنین به دلیل خطاهای انسانی و ابزاری ممکن است مواردی مانند ثبت نشدن آمار، ثبت آمار غلط، خرابی یا از بین رفتن دستگاه های اندازه گیری یا تشخیص داده های پرت و حذف آن ها با عنوان داده های گم شده پیش آید. بنا بر این، تخمین و برآورد این داده ها برای استفاده در مدل ها ضروری است و به منظور کاهش بروز خطا باید پیش از به کارگیری آن ها پیش پردازش صورت گیرد. عملیات پیش پردازش، سری داده را برای محاسبات از جمله کلاسه بندی، پیش بینی و تخمین آماده می کند و شامل حذف داده های گم شده، حذف داده های پرت، بازسازی مقادیر گم شده، و نرمال سازی داده ها است.

مواد و روش ها: در این تحقیق، به منظور تشخیص داده های پرت و بازسازی داده های گمشده و ناقص سری زمانی داده های هیدرولوژی، داده های دبی ماهانه شش ایستگاه هیدرومتری و داده های اقلیمی ۱۶ ایستگاه باران سنجی در حوزه زرينه رود در نرم افزار R برنامه نویسی و مورد بررسی قرار گرفتند. حوزه آبخیز زرينه رود بزرگترین حوضه آبخیز دریاچه ارومیه است. به منظور آزمون نرمال بودن داده ها از آزمون شاپیرو-ویلک و کولموگروف-اسمیرنوف استفاده گردید که مطابق نتایج به دست آمده داده های مورد استفاده دارای توزیع نرمال نبودند و پس از نرمال سازی داده ها محاسبات داده های پرت به روش های نمودار جعبه ای، z-score، هیستوگرام، مربع کای، میانگین و انحراف معیار و روش میانه انجام شد و داده هایی که از بالاترین مقدار مشخص شده بیشتر بودند حذف گردیدند. به منظور نسبت دهی و جایگذاری مقادیر گمشده از الگوریتم های KNN، رگرسیون لاسو و رگرسیون خطی بیزین استفاده گردید. روش رگرسیون لاسو یک روش منظم سازی است که هدف آن کاهش پیچیدگی مدل و جلوگیری از بیش برآزشی است. رگرسیون خطی بیزین نوعی تحلیل آماری است که ترکیبی از روش های رگرسیون خطی و بیزین را استفاده می کند. الگوریتم KNN یکی از روش های مبتنی بر نمونه است که با مدل های ناپارامتری و طبقه بندی یادگیری نظارت شده ارتباط دارد. برای ارزیابی دقت الگوریتم های نسبت دهی داده های گمشده از روش Cross Validation استفاده گردید و در ادامه، جهت محاسبه دقت روش های تخمین از دو معیار RMSE و R^2 استفاده شد.

یافته ها: نتایج آماری حاصل نشان می دهند که مقادیر p-value در هر شش ایستگاه مورد مطالعه کمتر از ۰/۰۵ بودند. به منظور ارزیابی صحت و دقت روش KNN از اعتبارسنجی متقابل استفاده گردید. مقادیر RMSE کمتر و نزدیک به صفر و R^2 بالاتر از ۰/۷ در تمامی ایستگاه ها نشان دادند که روش KNN یک روش مطمئن و دقیق در نسبت دهی و جایگذاری مقادیر گمشده بود و در مقایسه با روش رگرسیون لاسو و رگرسیون خطی بیزین نتایج بسیار دقیق تر و مطمئن تری را ارائه داد و موجب اختلال در روند سری داده نشد. مقادیر پرت ایستگاه های جان آقا و دره پنبه دان در ادامه و در نرمال سازی حذف گردیدند. چولگی و وجود داده پرت در روش هیستوگرام به ویژه ایستگاه های جان آقا، ساریقمیش و پل آدینان بایی نظمی همراه بودند و توزیع نامنظم و غیر نرمال داشتند که پس از نرمال سازی، داده های پرت مشخص و حذف شدند. میزان p-value در هر دو آزمون شاپیرو-ویلک و کولموگروف-اسمیرنوف مقادیری بسیار کمتر از ۰/۰۵ را نشان داد و گواه این مطلب است که داده ها در محدوده نرمال قرار دارند و نرمال سازی داده ها و حذف مقادیر پرت با دقت بالایی انجام شده است و در نتیجه محاسبه مقادیر پرت و شناسایی آن ها معنی دار است. آزمون روزنر برای هر سری داده مقدار حد بالا را در دو تست متوالی ارائه داده است و همان مقدار و مقادیر بالاتر از آن را به عنوان داده پرت در نظر می گیرد. نتایج مطابقت تابع چگالی احتمال مقادیر مشاهده ای و نسبت دهی شده به روش KNN نشان از تطابق قابل قبول دو تابع چگالی احتمال داشتند و این روش در نسبت دهی مقادیر حاکثر، متوسط و حداقل نسبت به دو روش دیگر در ایستگاه های مورد مطالعه موفق عمل کرد.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج به دست آمده از نمودار جعبه ای، داده هایی که خارج از ساقه قرار گیرند را به عنوان داده پرت معرفی می کند و بر همین اساس در نمودارهای جعبه ای تعداد داده های پرت در مقایسه با سایر روش ها به مقدار زیادی تشخیص داده می شود که به نظر می رسد روش مناسبی برای تشخیص داده پرت در داده های هیدرولوژیکی نباشد. روش KNN در تعیین داده های گمشده با استفاده از داده های مشاهداتی متناظر، در بین دو روش دیگر بسیار موثر عمل نمود. در این مطالعه، سری داده ها نرمال سازی و سپس مقادیر داده های پرت در آن ها محاسبه گردید و برای تعیین مقادیر محاسبه نشده و گمشده از روش KNN استفاده شد. در داده های دارای روند تغییرات کمتر، KNN بسیار دقیق عمل می نماید و یکی از دقیق ترین و مطمئن ترین روش های نسبت دهی و جایگذاری داده های گمشده است. به منظور اعتباریابی روش KNN، رگرسیون لاسو و رگرسیون بیزین از روش اعتبارسنجی متقابل یا Cross Validation استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده، الگوریتم KNN ضریب تبیین بالاتر از ۰/۷ و مقادیر RMSE نزدیک به صفر را نشان داد. روش KNN کارایی مطلوبی را در تخمین مقادیر گمشده در جریان های پیوسته و ناپیوسته نسبت به دو روش دیگر ارائه می دهد. این اثربخشی به توانایی KNN در دستیابی به مقدار بهینه نزدیکترین همسایه برمی گردد که آن را برای پیش بینی دقیق در شرایطی که جریان به حداقل رسیده باشد هم مناسب می سازد. دقت KNN به دلیل سادگی محاسبات و نیز اثر بالای آن در محاسبه و نسبت دهی داده های گمشده و گمشده است که در عین حال ساختار سری داده را نیز حفظ می کند.

واژه های کلیدی: حوضه زرينه رود، رگرسیون لاسو، رگرسیون خطی بیزین، شاپیرو-ویلک، نزدیکترین همسایه

مقدمه

اساس مطالعات هیدرولوژی داده‌های آماری دقیق است که با توجه به وجود خطاهای گسسته و پیوسته در اغلب داده‌های هیدرولوژی مانند بارش و دبی رودخانه بازسازی، تخمین و برآورد داده‌های گمشده از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Azimi-Habashi *et al.*, 2024; Naghdi *et al.*, 2010;) (Schafer & Graham, 2002). طبق تعریف، داده‌های پرت مقادیری هستند که خارج از محدوده طبیعی یک متغیر قرار دارند (Ben-Gal, 2005; Grubbs, 1969). وجود چنین داده‌هایی یک مشکل عمده در مطالعات تجربی در زمینه علوم تجربی است که در نتیجه عملکرد نادرست کاربران و به دلایل مختلفی از جمله ورود داده همراه با خطا، خطای تجهیزات در حین نمونه‌برداری و یا از دست دادن داده‌ها به دلیل مشکلات در ذخیره‌سازی داده رخ می‌دهد (Aryanmanesh, 2024;) (Boukerche *et al.*, 2020). معمولاً ساده‌ترین و متداول‌ترین رویه در بازسازی داده پرت حذف آن‌ها است. حذف داده‌های پرت از مجموع داده‌ها صورت می‌گیرد که در نتیجه مدل‌های آماری پارامتری قادر خواهند بود با داده‌های تعلیمی تطبیق داده شوند. روش‌های تشخیص داده‌های پرت شامل روش‌های نظارت‌شده، نیمه نظارت‌شده و نظارت‌نشده هستند و برخی روش‌های مبتنی بر توزیع، مبتنی بر خوشه‌بندی و مبتنی بر چگالی را شامل می‌شوند (Kiani, 2015). در این میان، داده‌های رقوم آب رودخانه‌ها به‌منظور تخمین دبی جریان از روابط تجربی استفاده می‌کنند و لازم است روش‌های محاسباتی مناسب به‌منظور افزایش دقت در محاسبات رقوم آب و تشخیص داده‌های پرت و بازسازی داده‌های گمشده مورد بررسی قرار گیرند (Bae & Ji, 2019; Boiten, 2003; Fenton & Keller, 2001; Herschy, 2008; Horner *et al.*, 2018). به دلیل خطای محاسباتی، مقادیر صحیح خاص، گزارش اشتباه و یا خطای نمونه‌برداری و همچنین به دلیل خطاهای انسانی و ابزاری ممکن است مواردی مانند ثبت نشدن آمار، ثبت آمار غلط، خرابی یا از بین رفتن دستگاه‌های اندازه‌گیری یا تشخیص داده‌های پرت و حذف آن‌ها با عنوان داده‌های گم‌شده پیش آید. بنا بر این، تخمین و برآورد این داده‌ها برای استفاده در مدل‌ها ضروری است و به‌منظور کاهش بروز خطا باید پیش از به کارگیری آن‌ها پیش‌پردازش صورت گیرد. عملیات پیش‌پردازش، سری داده را برای محاسبات از جمله کلاسه‌بندی، پیش‌بینی و تخمین آماده می‌کند و شامل حذف داده‌های گمشده، حذف داده‌های پرت، بازسازی مقادیر گمشده، و نرمال‌سازی داده‌ها است (Bahrami, 2018; Naghdi *et al.*, 2010). برای بازسازی و تکمیل داده‌های مختلف و رفع خلا داده‌های یک ایستگاه هواشناسی و هیدرولوژیکی، روش‌های مختلفی معرفی و توسعه داده شده‌اند که از جمله این روش‌های آماری می‌توان روش ایستگاه معرف، نسبت نرمال، رگرسیون خطی و محور مختصات را نام برد که از آن‌ها به‌عنوان روش‌های کلاسیک نام برده می‌شود. از روش‌های جدید نیز می‌توان به شبکه‌های عصبی، منطق فازی و رگرسیون فازی

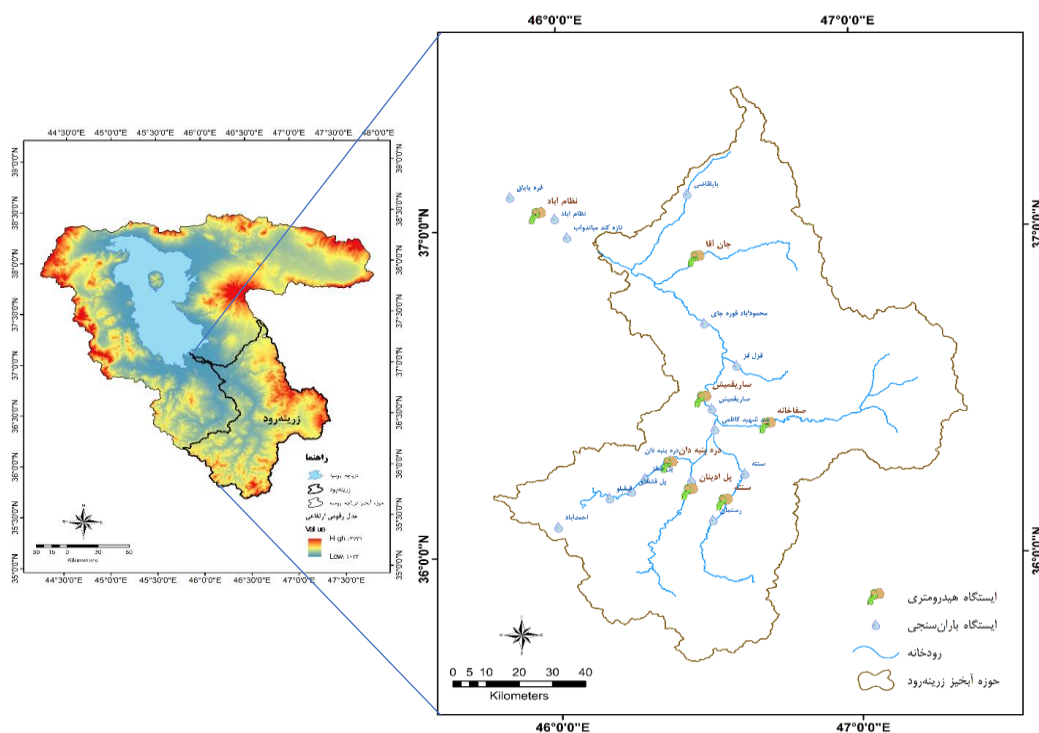
اشاره کرد (Naghdi *et al.*, 2010). تحقیقات مختلفی درخصوص تشخیص، شناسایی و بازسازی داده‌های پرت در هیدرولوژی صورت گرفته‌اند که به برخی از آن‌ها به اختصار اشاره می‌شود. رحمدل و همکاران (Rahmdel *et al.*, 2021) به ارزیابی و همگن‌سازی سری زمانی داده‌های دما و بارش در ایستگاه‌های هواشناسی با رویکرد تحلیل اکتشافی و آزمون فرض پرداختند. در نهایت، داده‌های پرت دمای بیشینه و کمینه را محاسبه نمودند و ایستگاه‌های همگن و ناهمگن شناسایی شدند. کیانی و منتظری (Kiani, 2015) به بررسی و مرور روش‌های مختلف تشخیص و شناسایی داده‌های پرت پرداختند. در مطالعه آن‌ها، مؤلفه‌های کلیدی داده‌های پرت، الگوریتم‌های اصلی بر اساس دامنه کاربرد و نوع ناهنجاری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند و انواع روش‌های پرکاربرد و جدید بررسی شدند. در مطالعه بهرامی و همکاران (Bahrami *et al.*, 2018) با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک شهر آباد به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، بارش پیش‌بینی شد و بهترین ساختار شبکه و بهترین روش نرمال‌سازی انتخاب شد. نتایج آن‌ها نشان دادند که مدل به حذف پارامتر بیشترین رطوبت، بیشتر از سایر پارامترها حساسیت نشان داد. در مطالعه آن‌ها، روش حداقل و حداکثر با ساختار شبکه سه لایه و ۱۳ لایه پنهان به‌عنوان بهترین روش نرمال‌سازی انتخاب شد. احمدی و همکاران (Ahmadi *et al.*, 2014) برای نرمال‌سازی داده‌های دبی جریان ماهانه و روزانه رودخانه باراندوزچای از توابع مختلف استفاده نمودند و با توجه به نتایج ضریب چولگی که مقادیر نزدیک به صفر را نشان داد، تابع لگاریتم را برای نرمال‌سازی انتخاب نمودند. آنها با استفاده از مدل‌های خطی و غیر خطی به مقایسه مدل‌ها در برآورد جریان رودخانه پرداختند. نتایج حاکی از آن بودند که مدل دوخطی در مقیاس روزانه باعث کاهش مقدار خطا شد و ضریب همبستگی را افزایش داد. نقدی و همکاران (Naghdi *et al.*, 2010) توانایی شبکه عصبی مصنوعی را در بازسازی داده‌های دبی ماهانه کارون بزرگ مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج این روش با نتایج روش‌های دیگر از جمله رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی چندمتغیره، خودهمبستگی، نسبت نرمال و محور مختصات مورد مقایسه قرار گرفتند. در هر روش، پس از حذف داده‌های مشاهداتی مقادیر آن‌ها با روش‌های مختلف برآورد شدند و با استفاده از میانگین مجذور مربعات خطا^۱ اولویت هر یک از این روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نتایج نشان دادند که شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با سایر روش‌ها برتری داشت. اومر و گری (Umar & Gray, 2023) روش KNN را به‌منظور نسبت‌دهی داده‌های گمشده مورد استفاده قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان دادند که روش KNN یکی از دقیق‌ترین روش‌ها جهت محاسبه و نسبت‌دهی مقادیر گمشده در داده‌های چندمتغیره بود. در پژوهش حاضر، سعی شده است که کارایی روش‌های پلات جعبه‌ای^۲، روش میانگین و انحراف معیار^۳، روش میانه^۴ روش Z-Score، تست

³ Mean Standard Deviation⁴ Median Absolute Deviation¹ RMSE² Box Plot

حوزه آبخیز زرینه رود، بزرگترین حوضه آبخیز از حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که در موقعیت جغرافیایی $47^{\circ} 45'$ تا $20^{\circ} 47'$ طول شرقی و $41^{\circ} 35'$ تا $27^{\circ} 37'$ عرض شمالی واقع شده است و مساحت آن حدود 12025 کیلومترمربع است. شهرهای میاندوآب، شاهین دژ، تکاب و سقز از کانون های شهری این حوضه هستند. سد شهید کاظمی زرینه رود تنها سد اصلی قابل بهره برداری حوضه است که از آن برای مصارف کشاورزی و شرب استفاده می گردد (شکل ۱).

نرمال سازی^۱ و روش های آماری گرابز^۲، دیکسون^۳، روزنر^۴ و مربع کای^۵ در ایستگاه های هیدرومتری حوضه آبخیز زرینه رود مورد ارزیابی قرار گیرد و مناسب ترین روش تشخیص داده های پرت شناسایی و داده های گمشده در سری داده جریان رودخانه مورد بازسازی قرار گیرد.

مواد و روش ها منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و ایستگاه های باران سنجی و هیدرومتری در حوزه آبخیز زرینه رود
Figure 1. Geographical location of the Zarrineh-Roud basin and rain gauges in Iran

شده اند. از داده های بارش ایستگاه های باران سنجی جهت محاسبه دبی استفاده شد. ابتدا داده های پرت ایستگاه های مذکور بررسی و مشخص شد. در قدم بعدی، داده های پرت حذف شده با روش KNN، رگرسیون لاسو و رگرسیون خطی بیزین نسبت دهی گردیدند. به منظور نسبت دهی و جایگذاری داده ها از آمار ایستگاه های باران سنجی (جدول ۲) استفاده گردید.

ایستگاه های مورد مطالعه

در این تحقیق، به منظور تشخیص داده های پرت و بازسازی داده های گمشده و ناقص سری زمانی، داده های هیدرولوژی از داده های دبی ماهانه شش ایستگاه هیدرومتری و داده های اقلیمی ۱۶ ایستگاه باران سنجی در حوزه زرینه رود در نرم افزار R برنامه نویسی و مورد بررسی قرار گرفتند. نقشه ایستگاه ها و موقعیت قرارگیری آن ها در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ آورده

⁴ Rosner
⁵ Chi Square

¹ Normal Test
² Grubs
³ Dixon

ارزیابی روش‌های تشخیص و بازسازی مقادیر پرت و گم‌شده در سری داده‌های هیدرولوژیکی حوزه آبخیز زرینه‌رود ۲۴

جدول ۱- ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

Table 1. Specification of discharge stations

نام ایستگاه	جان‌آقا	سنه	ساریقمیش	پل آدینان	دره پنبدان	نظام‌آباد
Name of the Station	Jan Agha	Senteh	Sarigamish	Pol Adinan	Dareh Panbedan	Nezam Abad
ارتفاع به متر Altitude (m)	1410	1434	1380	1460	1470	1283

جدول ۲- ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد مطالعه در بازسازی نواقص آماری

Table 2. Characteristics of rain gauge stations studied in missing value imputation

کد	PCP1	PCP2	PCP3	PCP4	PCP5	PCP6	PCP7	PCP8
نام ایستگاه	پل سقز	ساریقمیش	روستمان	قزل قز	قیقلو	دره‌پنبدان	پل	قره پاپاق
Name of the Station	Pol saghez	Sarigamish	Rostaman	Gezel gez	Gabgablou	Dareh Panbedan		Gara Papagh
ارتفاع به متر Altitude (m)	1480	1380	1900	1650	1500	1470	1460	1290
کد	PCP9	PCP10	PCP11	PCP12	PCP13	PCP14	PCP15	PCP16
نام ایستگاه	تازه‌کند	سد شهید	نظام‌آباد	سنه	قوره‌چای	پل قشلاق	احمدآباد سقز	باباقاضی
Name of the station	Tazekand	Sad Shahid-Kazemi	Nezam Abad	Senteh	Mahmood Abad goorechay	Pol geshlagh	Ahmadabad sagez	Babaghazi
ارتفاع به متر Altitude (m)	1290	1437	1283	1434	1500	1434	1686	1584

این روش، میانگین و انحراف معیار برای داده‌ها محاسبه می‌شوند و در صورت بالا بودن انحراف معیار در هر داده، آن داده به‌عنوان داده پرت در نظر گرفته می‌شود (Dave & Varma, 2014).

روش میانه

روش میانه مشابه میانگین عمل کرده، مقدار فاصله از مرکز داده‌ها را محاسبه می‌کند و این مقدار نسبت به حضور داده‌های پرت حساس‌تر است و یکی از روش‌های تشخیص داده‌های پرت با استفاده از میانه تعیین نقطه شکست است (Donoho & Huber, 1983). میزان انحراف مطلق از میانه یا MAD ^۱ با رابطه شماره ۱ محاسبه می‌شود.

$$MAD = b M_i (|x_i - M_j (x_j)|) \quad (1)$$

که در آن: x_j مشاهدات اصلی در سری داده، M_i میانه داده‌ها و b عدد ثابت هستند که به‌صورت پیش‌فرض عدد ثابت $1/4826$ با فرض نرمال بودن داده‌ها و بدون در نظر گرفتن ناهمگنی محاسبه می‌گردد (Dave & Varma, 2014).

روش HBOS

روش هیستوگرام یک روش ساده در تشخیص داده‌های پرت محسوب می‌گردد. روش مبتنی بر هیستوگرام توسط (Goldstein & Dengel, 2012)، ارائه شد و به‌نام الگوریتم HBOS^۲ نیز نامیده می‌شود (Smiti, 2020). روش هیستوگرام یک روش نظارت‌نشده در تشخیص داده‌های پرت به‌حساب می‌آید. این روش مقدار هر داده را به صورت مجزا بر اساس فراوانی و توزیع آماری آن مجموعه داده بررسی نموده، مقادیر غیر نرمال را بر اساس هیستوگرام سری داده شناسایی و به عنوان داده پرت معرفی می‌نماید.

روش Rosner

هدف از آزمون Rosner بررسی نرمال بودن پیش از انجام تحلیل‌های آماری بر روی داده‌ها است و سپس آزمون‌های مرتبط با بازسازی و یا حذف داده‌های ناهمگن و یا پرت انجام

تشخیص داده‌های پرت

به‌منظور تشخیص داده‌های پرت در سری زمانی داده‌های هیدرولوژیکی، از نرم‌افزار R و پکیج‌های $DMWR2$ ، VIM ، $graphics$ و $mvoutlier$ استفاده شد.

روش مبتنی بر چگالی

روش مبتنی بر چگالی ابتدا توسط (Breunig et al., 2000)، معرفی شد. این روش توزیع چگالی در داده ورودی را تخمین زده، سپس داده‌های پرت را بر اساس داده‌های قرار گرفته در مناطق دارای چگالی کمتر بر اساس چگالی نزدیک‌ترین همسایه تخمین می‌زند. داده‌ای که در کمترین فاصله با کمترین تراکم قرار گرفته باشد، به عنوان داده پرت و داده‌ای که در بخش با تراکم بالا قرار گرفته باشد، داده نرمال در نظر گرفته می‌شود.

روش باکس پلات یا نمودار جعبه‌ای (Box Plot)

ساده‌ترین روش برای تخمین و تشخیص داده‌های پرت، ارائه نمودار جعبه‌ای یا همان باکس پلات است. نمودار جعبه‌ای، داده‌های عددی را با توجه به توزیع آن‌ها در چارک‌های مختلف نشان می‌دهد. فاصله بین قسمت‌های مجزا در جعبه بازتاب گستردگی داده‌ها است. در یک نمودار جعبه‌ای، انتهای خطوط نمودار به احتمالات مختلف از جمله مقادیر حداقل و حداکثر داده‌ها، انحراف معیار حد بالا و پایین در میانگین داده‌ها، ۹٪ و ۹۱٪ داده‌ها، کمترین مقدار بین $Q_1 - 1.5 IQR$ در چارک پایین و بالاترین مقدار از $Q_3 + 1.5 IQR$ در چارک بالا اشاره دارد (Suri et al., 2019).

روش میانگین و انحراف معیار

در این روش، در صورت وجود داده پرت در سری داده، مقدار میانگین به‌شدت به یک سو متمایل خواهد بود. هر چه مقدار انحراف معیار کمتر باشد، نشان‌دهنده نزدیک بودن داده‌ها به مقدار میانگین است و در صورتی که مقدار انحراف معیار عدد بالاتری باشد، داده‌ها در محدوده بزرگتری گسترش یافته‌اند. در

² Histogram-Based Outlier Score

¹ Median Absolute Deviation

رابطه آزمون کلموگوروف-اسمیرنوف به صورت رابطه ۵ است (Ordooni *et al.*, 2021):

$$D_{n_1, n_2} = \max_x |F_{X, n_1}(x) - F_{Y, n_2}| \quad (5)$$

به منظور محاسبه بخش آماره کلموگوروف-اسمیرنوف باید مقدار حداکثر قدر مطلق $|F_{X, n_1}(x) - F_{Y, n_2}|$ به دست آید. در واقع، محاسبه این آزمون بر اساس حداکثر اختلاف توابع است.

بازسازی داده‌های گمشده

به منظور بازسازی داده‌های گمشده یا گمشده از سه روش KNN^1 ، $Lasso^2$ و Bayesian Linear Regression استفاده گردید. تکنیک‌های مورد استفاده موجب کاهش اثر خطی در مقادیر پیش‌بینی می‌شوند و از بیش‌برازش در مقادیر سری زمانی جلوگیری می‌کنند.

الگوریتم KNN

الگوریتم KNN یکی از روش‌های پرکاربرد مبتنی بر نمونه است که با مدل‌های ناپارامتری و طبقه‌بندی یادگیری نظارت شده ارتباط دارد و مقادیر نقاط گمشده یا محاسبه نشده در داده‌ها را با توجه به فاصله یا شباهت آن‌ها با داده‌های متناظر مشاهداتی سایر نقاط به دست می‌آورد (Umar & Gray, 2023). در اجرای این الگوریتم، فاصله بین متغیرهای وابسته و مقدار هدف، سه پارامتر اهمیت بالایی دارند از جمله این پارامترها تعداد همسایه، اندازه فاصله و وزن دهی یا عدم وزن دهی (Holmström & Fransson, 2003; Maanavi, 2012; Shataee *et al.*, 2012; Roozbeh, 2021). به طور کلی، از روش KNN به منظور تخمین تابع چگالی توزیع داده و طبقه‌بندی داده‌های آزمایشی بر اساس الگوی تعلیمی استفاده می‌شود. هدف این روش، طبقه‌بندی و تخمین ویژگی‌های سری داده گمشده بر اساس مقادیر مشابه و فاصله سری داده گمشده از مقادیر مشابه مشاهداتی است. قدم اول در این روش، تعیین فاصله بین داده‌های گمشده و داده‌های مشاهداتی است و عموماً از بین روش‌های تعیین فاصله روش اقلیدسی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد که طبق فرمول شماره ۶ محاسبه می‌شود. فاصله اقلیدسی در محاسبه نزدیکترین همسایه بر پایه اختلاف فاصله دو نقطه براساس مثلث و برپایه قضیه فیثاغورس محاسبه می‌شود.

$$d, (X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

که در آن X نمونه‌های تعلیمی و Y نمونه‌های آموزش با همان تعداد پارامتر هستند. پس از تعیین فاصله بین داده‌ها، نمونه‌ها به ترتیب صعودی از کمترین فاصله که همان حداکثر تشابه بین داده‌ها است، تا بیشترین فاصله قرار می‌گیرند. میزان کارایی این روش به دقت در انتخاب مشابه‌ترین داده‌ها بستگی دارد (Poursalehi *et al.*, 2019; Rajabi Jaghargh *et al.*, 2024). در روش KNN به منظور بازسازی داده از ایستگاه‌های باران‌سنجی و مقادیر بارش متناظر به منظور محاسبه و تشخیص دبی استفاده شد. در روش KNN برای محاسبه تشابه و نزدیکی بین هدف و داده‌های تعلیمی، فاصله اقلیدسی مورد استفاده قرار می‌گیرد که فاصله بین هر داده و مقدار هدف را تخمین می‌زند.

می‌گردد. روزنر معادله شماره ۲ را جهت تشخیص داده‌های پرت معرفی نمود.

$$T_1 = \frac{\max |X_i - \bar{X}|}{\hat{\sigma}} \quad (2)$$

که در آن: $\bar{X}$ و $\hat{\sigma}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار کل داده‌ها هستند. ابتدا داده پرت مربوط به $\max |X_i - \bar{X}|$ حذف و T_2 بر اساس باقی داده‌ها محاسبه می‌شود و این عمل تا محاسبه T_k و تا زمانی که داده پرت باقی نماند ادامه می‌یابد (Cohn *et al.*, 2013).

روش آزمون مربع کای

آزمون مربع کای به منظور تعیین تفاوت‌ها میان متغیرها در سری داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و احتمال فرض صفر را در مشاهدات ارزیابی می‌کند. آزمون آماری مربع کای از توزیع پیرسون تبعیت می‌نماید. در این آزمون، پیرسون محدوده‌ای را بین x_j و M تقسیم می‌کند که در این محدوده توزیع N_i و پارامترهای n طبق رابطه شماره ۳ محاسبه خواهد شد:

$$P_i = P(X_j \text{ fall in } E_i) = \int_{E_i} d_F(x) \quad (3)$$

توزیع پیرسون زمانی به مربع کای می‌رسد که ابتدا مقادیر $N_i - np_i$ در تعداد نمونه‌های زیاد تقریباً از توزیع نرمال چندمتغیره پیروی نماید و اگر $M-1$ سول در نظر گرفته شود، این توزیع تک‌متغیره نخواهد بود. دوم این که اگر $Y = (Y_1, \dots, Y_p)$ از توزیع نرمال p متغیره پیروی نماید، فرم مربع توزیع پیرسون به عنوان تابعی از Y خواهد بود. بنابراین، اگر $Y = (N_i - np_i)$ باشد، مربع آن طبق رابطه شماره ۴ محاسبه خواهد شد.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i} \quad (4)$$

که در آن: فرم مربع $(Y - \mu)' \Sigma^{-1} (Y - \mu)$ در توان تابع چگالی توزیع $\chi^2_{(p)}$ به عنوان تابعی از Y است (D'Agostino, 1986).

نرمال‌سازی داده‌ها

توزیع نرمال یکی از متداول‌ترین و مهمترین توزیع‌های احتمالی پیوسته به‌شمار می‌رود که گاهی بنام توزیع گوسین نیز نامیده می‌شود و برای آزمون خطای محاسباتی به‌کار برده می‌شود. احتمال دارد که مقادیر داده‌های مورد مطالعه با محدوده خود یا دامنه‌ای که در آن قرار دارند، متفاوت باشند و اگر این مقدار متفاوت بسیار بزرگ باشد، به همان نسبت اثر بالایی در تابع هزینه خواهد داشت؛ این مشکل با نرمال‌سازی داده‌ها رفع می‌شود (Nazeri Tahrudi, 2014; Tourian *et al.*, 2017). در این مطالعه، آزمون Z-score جهت ارزیابی و نرمال‌سازی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پیش از تشخیص داده‌های پرت، ابتدا باید نرمال‌سازی انجام شود و به این منظور از آزمون‌های مختلف جهت نرمال‌سازی استفاده شد. آزمون‌های کلموگوروف-اسمیرنوف و آزمون شاپیرو-ویلک به منظور نرمال‌سازی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. با اجرای نرمال‌سازی، اثر داده‌های پرت کاهش می‌یابد چراکه داده‌های پرت می‌توانند تأثیر زیادی بر مدل‌ها داشته باشند و باعث ایجاد خطاهای جدی شوند (Montgomery & Runger, 2019).

² Least Absolute Shrinkage and Selection Operator

¹ K Nearest Neighbor

تعداد K داده دارای کمترین فاصله نسبت به مقدار هدف به عنوان نزدیکترین همسایه در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۳- ایستگاه‌های متناظر باران‌سنجی و هیدرومتری در محاسبه KNN

Table 3. Related rain gauge and discharge stations in KNN calculation

ایستگاه‌های باران‌سنجی متناظر Related rain gauge stations		ایستگاه‌های هیدرومتری Discharge Station	
نظام‌آباد Nezam Abad	تازه‌کند میاندوآب Tazekand Miandoab	نظام‌آباد (Nezam Abad)	دره پنه‌دان (Dareh Panbedan)
قره پاپاق Gara Papagh	دره پنه‌دان Dareh Panbedan	قبقلو Gabgablou	پل آدینان (Pol Adinan)
قره پاپاق Gara Papagh	دره پنه‌دان Dareh Panbedan	قبقلو Gabgablou	ساریقمیش (Sarigamish)
احمدآباد سقر Ahmadabad sagez	ساریقمیش Sarigamish	پل سقر Pol Saghez	سنه (Sente)
پل قشلاق Pol geshlagh	سنه Sente	روستمان Rostaman	جان آقا (Jan Agha)
باباقاضی Babaghazi	سد شهید کاظمی Sad Shahid-Kazemi	قرزل قر Gezel gez	
محمودآباد قورده‌چای Mahmood Abad goorechay			

رگرسیون لاسو^۱

روش رگرسیون لاسو یک روش منظم‌سازی است که هدف آن کاهش پیچیدگی مدل و جلوگیری از بیش‌برازشی است. در رگرسیون لاسو به جای محاسبه مربعات مقادیر، مقدار دقیق آن‌ها وارد محاسبه می‌شود. این نوع از منظم‌سازی، ضرایب را به صفر نزدیک می‌کند. از این‌رو، برخی تخمین‌گرها در ارزیابی خروجی مدل عملکرد خوبی ندارند، اما لاسو نه تنها در کاهش بیش‌برازش موثر عمل می‌کند، بلکه در انتخاب نوع ویژگی مدل نیز کمک می‌کند.

(۹)

$$Lasso\ regression = \min_{\beta_0, \beta} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - x_i^T \beta)^2 \right\}$$

استفاده از رگرسیون لاسو به محقق کمک می‌کند تا روش مناسب برای مدل‌سازی متغیر پاسخ با استفاده از کمترین و بهترین تعداد متغیرهای مستقل را پیدا نماید. از جمله دلایل استفاده از رگرسیون لاسو عبارت‌اند از: هم‌خطی درون مدل وجود داشته باشد، مدل دچار بیش‌برازشی باشد، و مدل دارای واریانس خیلی بالا باشد. رگرسیون لاسو با قرار دادن یک پارامتر تنظیمی عوامل ناهنجاری را کاهش می‌دهد و با توجه به این که در رگرسیون لاسو امکان فرض ضرایب مقادیر صفر نیز وجود دارد، می‌تواند یکی از روش‌های انتخاب متغیر تلقی شود.

رگرسیون خطی بیزین^۲

رگرسیون خطی بیزین نوعی تحلیل آماری است که ترکیبی از روش‌های رگرسیون خطی و بیزین را استفاده می‌کند. این روش به طور خاص در شرایطی مفید است که اطلاعات قبلی در دسترس باشد و خواسته شود داده‌ها با داده‌های جدید ترکیب شوند و تخمین‌های دقیق‌تر به دست آیند. در رگرسیون خطی بیزین، فرض می‌شود که ضریب‌ها دارای توزیع احتمالاتی هستند. به عبارت دیگر، به جای این که یک مقدار ثابت برای هر ضریب وجود داشته باشد، یک توزیع احتمال برای هر ضریب تعریف می‌شود. این توزیع‌های احتمالاتی با استفاده از اطلاعات

قبلی و داده‌های جدید به‌روزرسانی می‌شوند تا تخمین بهتری از ضرایب بدست آید. با استفاده از قاعده بیز، توزیع پسین ضرایب به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p(\beta|X, y) \propto (y|x, \beta, \sigma^2).p(\beta) \quad (۱۰)$$

معیارهای ارزیابی

در این مطالعه، به منظور ارزیابی و بررسی صحت نتایج حاصل به روش اعتبارسنجی متقابل^۳ از دو معیار ارزیابی RMSE^۴ (جزر میانگین مربعات خطا) و ضریب همبستگی R^۲ استفاده گردید. RMSE اختلاف بین دو سری داده و R^۲ همبستگی میان دو سری داده را نشان می‌دهد. معادلات ۱۱ و ۱۲ به ترتیب نحوه محاسبات معیارهای ارزیابی را نشان می‌دهند (Bahrami, 2018).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (۱۱)$$

که در آن n نشان دهنده تعداد کل داده‌های مشاهداتی، X_i مقداری واقعی و Y_i مقادیر تخمینی هستند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (۱۲)$$

رابطه بین R^۲ و RMSE به شکل زیر است (رابطه ۱۳).

$$R^2 = 1 - \left(\frac{RMSE^2}{\sigma_y^2} \right) \quad (۱۳)$$

که در آن σ_y^۲ واریانس کل داده‌های مقادیر مشاهده‌ای است.

نتایج و بحث

توزیع داده‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ و نمودار جعبه‌ای داده‌ها در شکل شماره ۳ نشان داده شده‌اند. شکل ۲ بیانگر وجود چولگی در داده‌های ایستگاه‌های دره‌پنه‌دان و جان‌آقا است و ایستگاه‌های نظام‌آباد، پل‌آدینان، سنه و ساریقمیش دارای چولگی نسبتاً زیادی هستند. بر اساس نمودارهای جعبه‌ای این مطالعه، داده‌های ایستگاه‌های جان‌آقا و دره‌پنه‌دان دارای مقادیر پرت با حدود بالاتری در مقایسه با

^۴ Root Mean Square Error

^۵ R-Squared

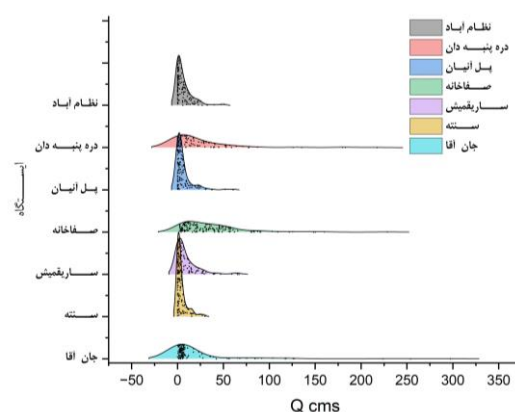
^۱ Lasso Regression

^۲ Bayesian Linear Regression

^۳ Cross Validation

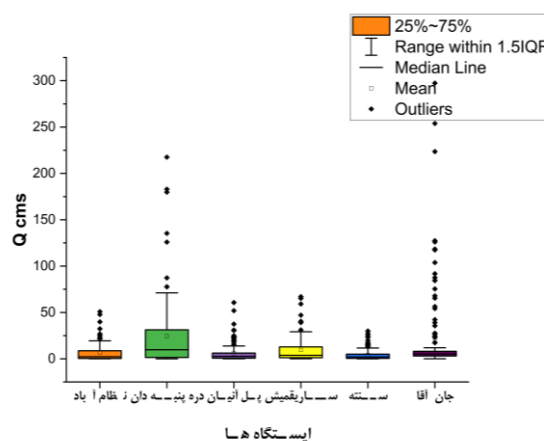
(شکل های ۷، ۸ و ۹)، مقادیر منفی نسبت دهی شده اند که عملاً وجود مقادیر منفی در جریان رودخانه امکان پذیر نیست و این مساله بیانگر دقت پایین این دو روش در محاسبه و نسبت دهی داده های گمشده است. وجود مقادیر منفی باعث برهم خوردگی نظم توزیع داده شده است (اشکال ۱۰، ۱۱ و ۱۲). میزان پایین R^2 تا ۰/۰۰۱ و مقادیر بالای RMSE تا حدود ۵۵ در هر دو روش رگرسیون لاسو و رگرسیون خطی بیزین نشان دهنده عدم اطمینان از به کارگیری این روش ها در نسبت دهی داده های گمشده است (جدول ۷). در روش های رگرسیون لاسو و رگرسیون خطی بیزین (جدول ۷)، مقادیر R^2 و RMSE قابل قبول نیستند و در مقایسه با KNN روش های مطمئنی نمی توانند تلقی گردند. به منظور بررسی و انتخاب مناسب ترین روش نسبت دهی داده های گمشده اقدام به بررسی تابع چگالی احتمال داده های مشاهده ای و تابع چگالی احتمال سری داده نسبت دهی شده گردید (شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲). نتایج مقایسه تابع چگالی احتمال به روش رگرسیون لاسو (شکل ۱۰) نشان از عدم تطابق مقادیر حداکثر و حداقل در سری داده هیدرولوژیکی دارند و این روش می تواند موجب برهم خوردگی تابع چگالی احتمال گردد. همچنین، نتایج مقایسه تابع چگالی احتمال به روش رگرسیون بیزین (شکل ۱۱) بیانگر عدم تطابق حداکثر و متوسط در سری داده هستند و بنا بر این، این روش می تواند موجب برهم خوردگی تابع چگالی احتمال حاصل از نسبت دهی گردد. نتایج مطابقت تابع چگالی احتمال مقادیر مشاهده ای و نسبت دهی شده به روش KNN (شکل ۱۲) نشان از تطابق قابل قبول دو تابع چگالی احتمال دارند و این روش در نسبت دهی مقادیر حداکثر، متوسط و حداقل نسبت به دو روش دیگر در ایستگاه های مورد مطالعه موفق عمل کرده است. بنابراین، می توان نسبت به به کارگیری سری داده نسبت داده شده داده های گمشده در مدل سازی های بعدی استفاده نمود.

سایر ایستگاه ها هستند. ایستگاه های پل آدینان و سننه باتوجه به اینکه داده های خارج از ساقه داشتند اما درصد داده های خارج از چارک کمتر هستند و مقادیر نمایش داده شده به صورت داده پرت مورد شناسایی قرار گرفته اند. مقادیر پرت ایستگاه های جان آقا و دره پنبه دان در ادامه و در نرمال سازی حذف گردیدند. چولگی و وجود داده پرت در روش هیستوگرام به ویژه ایستگاه های جان آقا، ساریقمیش و پل آدینان بابتی نظمی همراه است و توزیع ناهمگن و غیر نرمال دارند که پس از نرمال سازی، داده های پرت مشخص و حذف شدند. میزان p-value در هر دو آزمون شاپیرو-ویلک و کولموگروف-اسمیرنف مقادیری بسیار کمتر از ۰/۰۵ را نشان داده است و گواه این مطلب است که داده ها ابتدا در محدوده نرمال نبودند و با نرمال سازی در محدوده نرمال قرار گرفتند و نرمال سازی داده ها و حذف مقادیر پرت با دقت بالایی انجام شد. آزمون روزنر برای هر سری داده مقدار حد بالا را در دو تست متوالی ارائه داده است و همان مقدار و مقادیر بالاتر از آن را به عنوان داده پرت در نظر می گیرد. به منظور اعتباریابی روش KNN، رگرسیون لاسو و رگرسیون بیزین از روش اعتبارسنجی متقابل یا Cross Validation استفاده شد که نتایج ارزیابی آن در جدول ۶ ارائه شده اند. اشکال ۷، ۸ و ۹ نیز نتایج نسبت دهی داده های گمشده را که به روش اعتبارسنجی متقابل انجام شده است، نشان می دهند. در این روش، ابتدا از قسمت های مختلف هیدروگراف که شامل دبی حداقل و دبی حداکثر و مقادیر متوسط دبی را داشت، به تعداد ۱۰ مشاهده حذف و به روش رگرسیون لاسو، رگرسیون بیزین و روش نزدیکترین همسایه، نسبت دهی انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، الگوریتم KNN ضریب تبیین بالاتر از ۰/۷ و مقادیر RMSE نزدیک به صفر را نشان داده است. نتایج بیانگر تطابق خوب دبی مشاهده ای و دبی بازسازی شده توسط الگوریتم KNN در کلیه ایستگاه های مورد مطالعه هستند. در رگرسیون لاسو و رگرسیون خطی بیزین

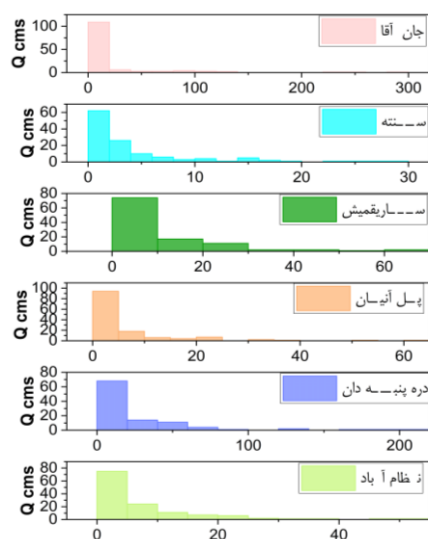


شکل ۲- توزیع داده ها در ایستگاه های مورد مطالعه

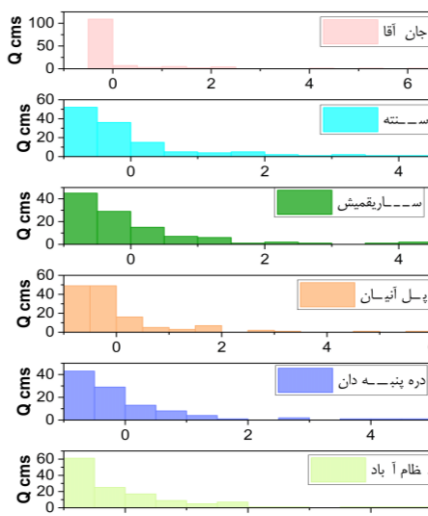
Figure 2. Probability of distribution at the studied stations



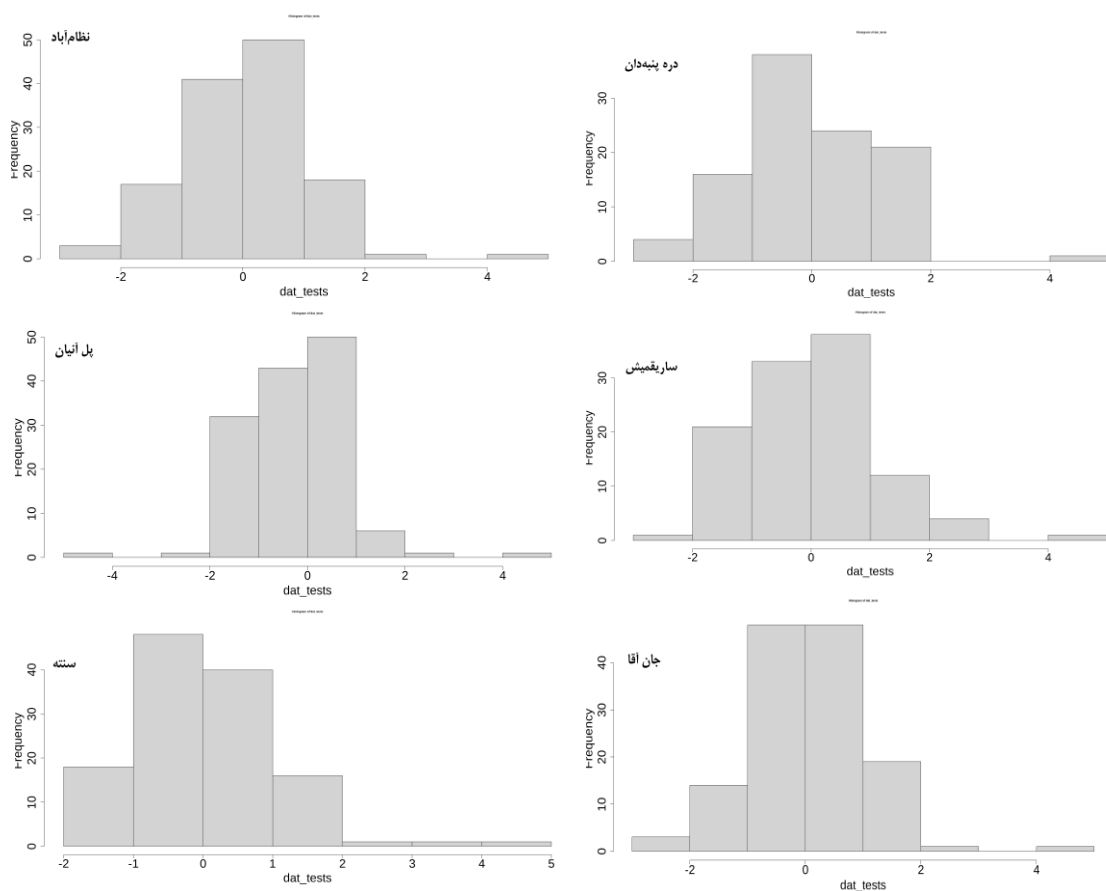
شکل ۳- نمودارهای جعبه‌ای در ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 3. Box plots at the studied stations



شکل ۴- نمودار هیستوگرام توزیع داده‌ها به تفکیک ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 4. The histogram plot at the stations



شکل ۵- نمودارهای هیستوگرام Z-score به تفکیک ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 5. Z-Score histogram plots at the stations



شکل ۶- هیستوگرام توزیع داده‌ها پس از نرمال‌سازی داده‌ها
Figure 6. Histogram plots of data after normalization

جدول ۴- نتایج آزمون‌های آماری و برازش داده در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 4. Results of statistical tests in study area stations

جان آقا	سنته	ساریقمیش	پل آدینان	دره پنبه‌دان	نظام آباد	
Jan Agha	Senteh	Sarigamish	Pol Adinan	Dare Panbedan	Nezam Abad	
20.73	4.23	9.55	6.01	24.62	6.76	Mean (میانگین)
45.88	5.97	13.43	9.57	39.24	9.40	Std (انحراف معیار)
-4.98	-5.52	-10.64	-7.36	-30.8	-7.05	Min (حدافل)
15.16	9.48	18.05	12.64	50.24	11.59	Max (حداکثر)
3.35	1.97	3.73	2.64	9.72	2.27	Med (میانه)
Q-Q plot						
0.45	0.7	0.7	0.62	0.62	0.708	Min (حدافل)
3.38	0.62	0.62	0.56	0.59	0.67	1 st quartile (چارک اول)
0.34	0.37	0.43	0.35	0.37	0.47	Median (میانه)
0	0	0	0	0	0	Mean (میانگین)
0.27	0.12	0.24	0.02	0.15	0.205	3 rd quartile (چارک سوم)
6.03	4.31	4.27	5.70	4.91	4.69	Max (حداکثر)
-1.70	-3.08	-5.97	-4.1	-17.61	-4.02	Lower band (باند پایین)
11.88	7.04	13.38	9.38	37.05	8.56	Upper band (باند بالا)
Summary of outliers (خلاصه داده‌های پرت)						
2	3	3	3	2	2	Min (حدافل)
16.5	26.25	19.5	17	19	30	1 st quartile (چارک اول)
53	58.5	63	63	56.5	75.5	Median (میانه)
58.59	57.82	55.04	60.6	50.82	68.71	Mean (میانگین)
104.5	86.5	85	85	73.75	99.75	3 rd quartile (چارک سوم)
126	118	109	129	100	129	Max (حداکثر)

ارزیابی روش‌های تشخیص و بازسازی مقادیر پرت و گمشده در سری داده‌های هیدرولوژیکی حوزه آبخیز زرینه‌رود ۳۰

جدول ۵- تشخیص نرمال بودن داده‌ها و تعیین داده‌های ناهمگن در سری داده

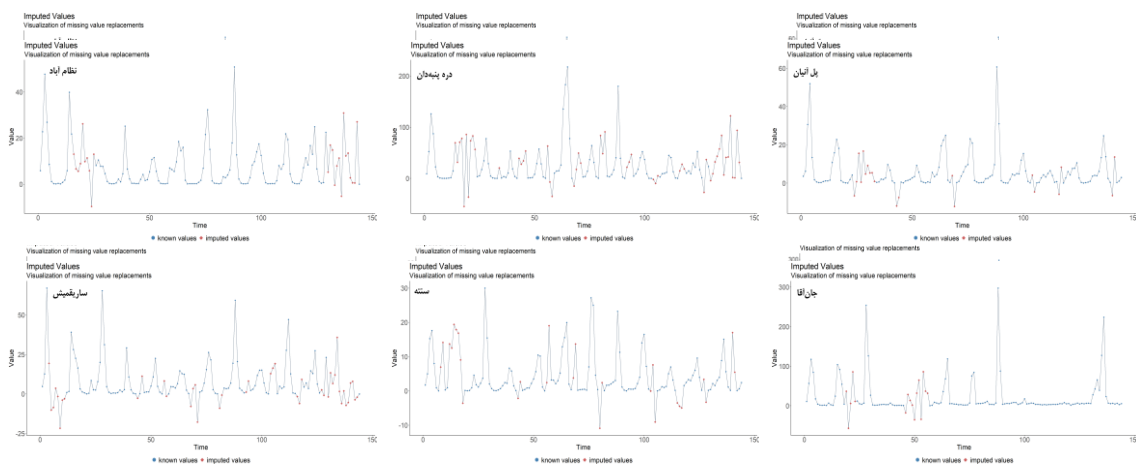
Table 5. Normality test results in study area stations

جان‌آقا Jan Agha	سته Senteh	ساریقمیش Sarigamish	پل آدینان Pol Adinan	دره پنه‌دان Dare Panbedan	نظام آباد Nezam Abad	
Rosner test 1						
20.73	4.23	9.55	6.01	24.62	6.76	Mean (میانگین)
45.88	5.97	13.43	9.57	39.24	9.40	Std (انحراف معیار)
297.41	30	66.97	60.66	217.51	50.89	Value (مقدار)
6.02	4.31	4.27	5.7	4.91	4.69	R i+1
3.47	3.45	3.41	3.48	3.39	3.46	Lambda i+1
true	true	true	true	true	true	Outlier (داده پرت)
Rosner test 2						
18.63	4.02	9.02	5.60	22.73	6.41	Mean (میانگین)
39.15	5.52	12.29	8.34	34.40	8.58	Std (انحراف معیار)
253.85	27.18	65.27	51.91	182.96	47.75	Value (مقدار)
6.007	4.19	4.57	5.55	4.65	4.81	R i+1
3.47	3.45	3.41	3.47	3.39	3.46	Lambda i+1
true	true	true	true	true	true	Outlier (داده پرت)
Shapiro-Wilk test						
0.45	0.69	0.69	0.62	0.63	0.71	W
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	P-value
Kolmogorov-Smirnov						
0.38	0.23	0.23	0.26	0.26	0.23	D
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	P-value
Chi square Highest values						
36.35	18.60	18.22	32.96	24.15	22.03	X
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	P-value
Chi square Lowest values						
0.20	0.50	0.50	0.39	0.39	0.50	X
0.65	0.47	0.47	0.53	0.53	0.47	P-value

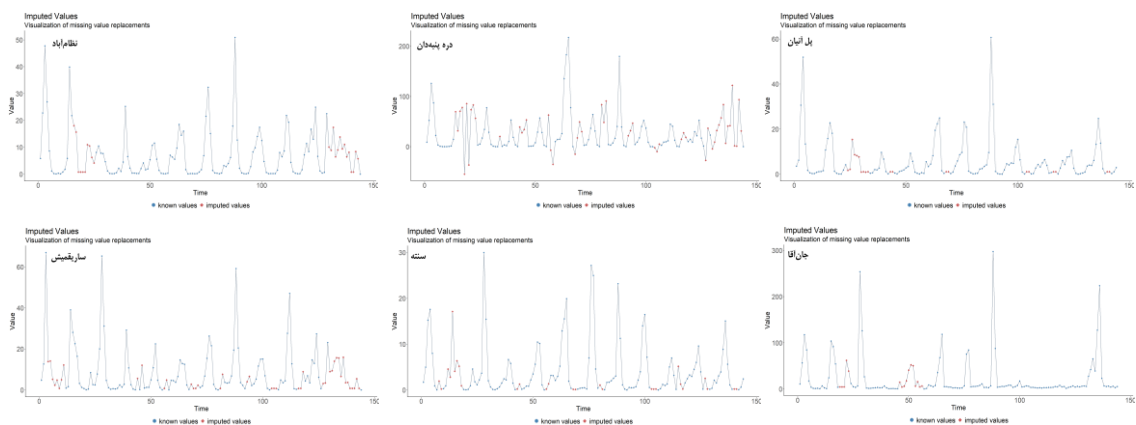
جدول ۶- بخشی از نتایج اعتباریابی به‌روش Cross Validation در الگوریتم‌های نسبت‌دهی KNN، رگرسیون لاسو و رگرسیون بیزین

Table 6. Part of validation results with the cross validation method in imputing algorithms of KNN, Lasso Regression, and Bayesian Regression

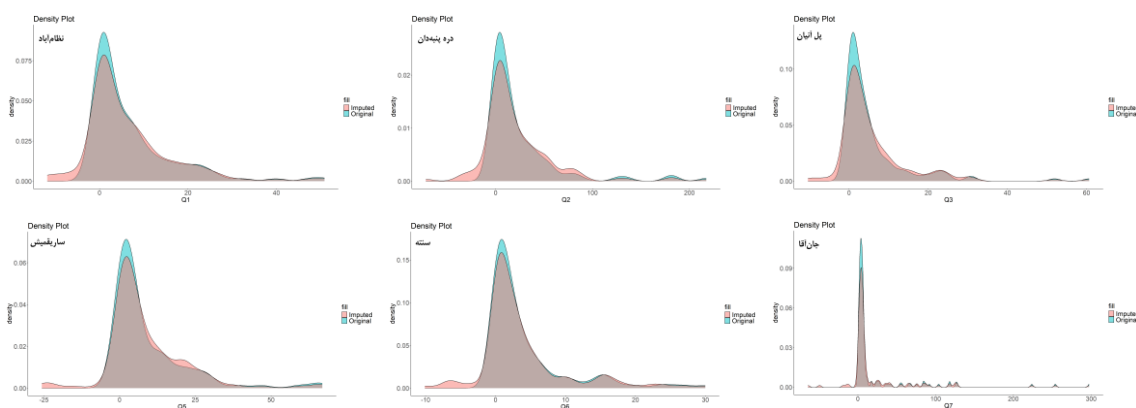
پس از اعمال KNN (After KNN)						پیش از اجرای KNN (Before KNN)						
ردیف Series	نظام آباد Nezam Abad	دره پنه‌دان Dare Panbedan	پل آدیان Pol Adinan	ساریق‌میش Sarigamish	سته Senteh	جان‌آقا Jan Agha	نظام آباد Nezam Abad	دره پنه‌دان Dare Panbedan	پل آدیان Pol Adinan	ساریق‌میش Sarigamish	سته Senteh	جان‌آقا Jan Agha
1	1.28	10.52	1.11	2.59	1.20	6.16	NA	NA	NA	NA	NA	6.16
2	5.07	7.11	1.84	5.14	1.65	4.34	NA	NA	NA	NA	NA	4.34
3	1.61	2.06	0.29	1.26	0.06	6.06	NA	NA	0.29	NA	0.06	6.06
4	2.51	3.07	1.10	1.85	0.61	3.06	NA	NA	1.10	NA	0.61	3.06
5	5.09	9.42	2.94	4.09	2.41	5.41	NA	NA	2.94	NA	2.41	5.41
پس از اعمال رگرسیون لاسو (After Lasso regression)						پیش از اعمال رگرسیون لاسو (before Lasso regression)						
ردیف Series	نظام آباد Nezam Abad	دره پنه‌دان Dare Panbedan	پل آدیان Pol Adinan	ساریق‌میش Sarigamish	سته Senteh	جان‌آقا Jan Agha	نظام آباد Nezam Abad	دره پنه‌دان Dare Panbedan	پل آدیان Pol Adinan	ساریق‌میش Sarigamish	سته Senteh	جان‌آقا Jan Agha
1	17.59	82.04	-5.75	7.03	-5.57	11.89	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	-0.19	-6.12	21.88	4.64	5.30	14.15	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	-5.53	75.72	0.29	-2.68	0.06	10.15	NA	NA	0.29	NA	0.06	NA
4	1.51	1.13	1.10	30.03	0.61	6.58	NA	NA	1.10	NA	0.61	NA
5	8.57	33.01	2.94	11.07	2.41	76.26	NA	NA	2.94	NA	2.41	NA
پس از اعمال رگرسیون بیزین (After Bayesian regression)						پیش از اجرای رگرسیون بیزین (Before Bayesian regression)						
ردیف Series	نظام آباد Nezam Abad	دره پنه‌دان Dare Panbedan	پل آدیان Pol Adinan	ساریق‌میش Sarigamish	سته Senteh	جان‌آقا Jan Agha	نظام آباد Nezam Abad	دره پنه‌دان Dare Panbedan	پل آدیان Pol Adinan	ساریق‌میش Sarigamish	سته Senteh	جان‌آقا Jan Agha
1	13.04	69.38	-6.6	19.38	13.7	36.46	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	6.64	31.57	0.72	-10.18	12.49	-56.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	5.61	70.46	0.29	-8.56	0.06	5.7	NA	NA	0.29	NA	0.06	NA
4	8.93	77.92	1.10	3.58	0.61	85.68	NA	NA	1.10	NA	0.61	NA
5	26.16	-54.76	2.94	-1.58	2.41	10.98	NA	NA	2.94	NA	2.41	NA



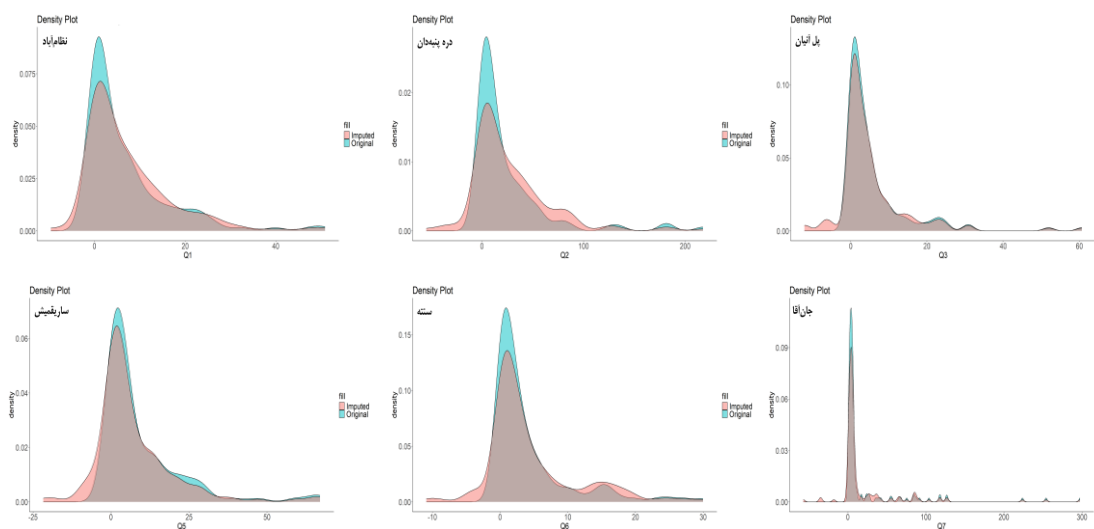
شکل ۸- نسبت‌دهی داده‌های گمشده به‌روش رگرسیون بیزین
Fig 8. Imputation of missing values using the Bayesian Regression method



شکل ۹- نسبت‌دهی داده‌های گمشده به‌روش KNN
Fig 9. Imputation of missing values using the KNN method

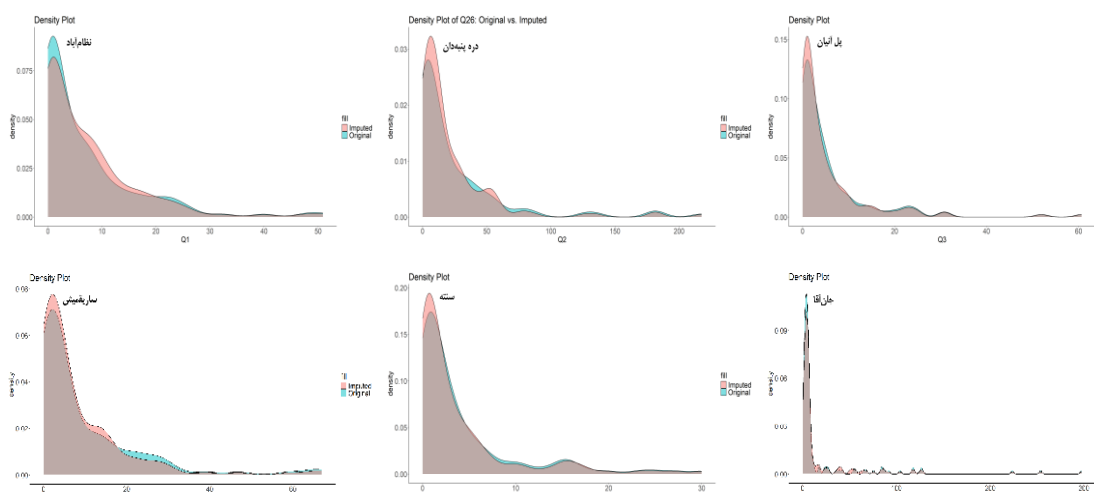


شکل ۱۰- تابع چگالی احتمال مقایسه داده‌های اصلی و نسبت‌دهی شده به روش رگرسیون لاسو
Fig 10. Probability distribution of actual values and imputed values using the Lasso Regression method



شکل ۱۱- تابع چگالی احتمال داده‌های اصلی و نسبت‌دهی شده به روش رگرسیون بیزین

Fig 11. Probability distribution of actual values and imputed values using the Bayesian Regression method



شکل ۱۲- تابع چگالی احتمال داده‌های اصلی و نسبت‌دهی شده به روش KNN

Fig 12. Probability distribution of actual values and imputed values using the KNN method

جدول ۷- نتایج آماری محاسبه داده‌های گم‌شده به روش‌های KNN، رگرسیون لاسو و رگرسیون بیزین

Table 7. Statistical results of computing missing values by KNN, Lasso Regression, and Bayesian Regression

ایستگاه		نظام‌آباد (Nezam Abad)		دره پنبدان (Dare Panbedan)		پل آدینان (Pol Adinan)		سارقمیش (Sarigamish)		ستته (Senteh)		جان‌آقا (Jan Agha)	
روش		RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2
لاسو (Lasso)		8.74	0.07	44.11	0.01	10.75	0.3	18.73	0.08	7.51	0.5	31.7	0.6
بیزین (Bayesian)		11.04	0.0001	55.12	0.04	10.68	0.24	15.5	0.5	10.39	0.14	49.09	0.1
KNN		1.72	0.9	25.8	0.63	0.98	0.99	4.07	0.91	5.51	0.75	1.72	0.9

نتیجه گیری کلی

KNN کارایی مطلوبی را در تخمین مقادیر گمشده در جریان های پیوسته و ناپیوسته نسبت به دو روش دیگر ارائه می دهد. این اثربخشی به توانایی KNN در دستیابی به مقدار بهینه نزدیکترین همسایه برمی گردد که آن را برای پیش بینی دقیق در شرایطی که جریان به حداقل رسیده باشد هم مناسب می سازد. دقت KNN به دلیل سادگی محاسبات و نیز اثر بالای آن در محاسبه و نسبت دهی داده های گمشده و گمشده است که در عین حال ساختار سری داده را نیز حفظ می کند. در موارد خاص، این روش به داده پرت و وجود نویز حساس است که ممکن است بر اثربخشی آن تاثیر منفی بگذارد. وجود ناپایداری در سری داده و وجود تغییرات در آن و همین طور نبود داده در مابین سری داده های پیوسته باعث کاهش دقت رگرسیون لاسو می شود. این نوع رگرسیون برای داده های کاملاً پیوسته که با هدف ایجاد پایداری در مدل مورد استفاده قرار می گیرند نتایج خوبی می تواند ارائه نماید اما در سری داده جریان رودخانه دقت پایینی دارد که با نتایج (Li et al., 2020; Maanavi & Roozbeh, 2021) تطابق دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده، نمودار جعبه ای داده هایی را که خارج از ساقه قرار گیرند به عنوان داده پرت معرفی می کند و بر همین اساس در نمودارهای جعبه ای تعداد داده های پرت در مقایسه با سایر روش ها به مقدار زیادی تشخیص داده می شود که به نظر می رسد روش مناسبی برای تشخیص داده پرت در داده های هیدرولوژیکی نباشد. روش KNN در تعیین داده های گمشده با استفاده از داده های مشاهداتی متناظر، در بین دو روش دیگر بسیار مؤثر عمل نموده است و در نتیجه، نیاز به نرمال سازی دارند. در این مطالعه، سری داده ها نرمال سازی و سپس مقادیر داده های پرت در آن ها محاسبه گردید و جهت تعیین مقادیر محاسبه نشده و گمشده از روش KNN استفاده شد. یکی از معایب این روش این است که دقت آن در مناطقی که داده های یکنواختی ندارند کمتر از حد مورد انتظار بوده است. در داده های دارای روند تغییرات کمتر، KNN بسیار دقیق عمل می نماید و یکی از دقیق ترین و مطمئن ترین روش های نسبت دهی و جایگذاری داده های گمشده است. روش

References

- Ahmadi, F., Dinpajoh, Y., & Fard, A. F. (2014). Comparing linear and nonlinear time series models in river flow forecasting (case study: Baranduz-chai river). *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(1), 93-105. [In Persian]
- Aryanmanesh J, N. H., Mahmoodi P, Khosravi P. (2024). Reconstruction of Missing Daily Streamflow Data using the MissForest Algorithm in Southern Baluchestan Basin, Iran. *Journal of Watershed Management Research*, 15(2), 49-64. [In Persian]
- Azimi-Habashi, S., Miryaghoubzadeh, M., Erfanian, M., & Javan, K. (2024). Projection of Future Climatic Variables based on CMIP5 and CMIP6 Models in the Gedarchay Catchment (West Azarbaijan). *Journal of Watershed Management Research*, 15(2), 1-16. <https://doi.org/doi:10.61186/jwmr.15.2.1>. [In Persian]
- Bae, I., & Ji, U. (2019). Outlier detection and smoothing process for water level data measured by ultrasonic sensor in stream flows. *Water*, 11(5), 951. <https://doi.org/doi.org/10.3390/w11050951>
- Bahrami, M., Amiri, M.J., Rezaei Maharlouyi, F., & Ghaffari, K. (2018). Determining the effect of data preprocessing on the performance of artificial neural networks for predicting monthly precipitation in Abadeh County. *Eco-Hydrology*, 4(1), 29-37. [In Persian]
- Ben-Gal, I. (2005). Outlier detection. *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, 131-146. https://doi.org/doi.org/10.1007/0-387-25465-X_7
- Boiten, W. (2003). *Hydrometry: IHE Delft lecture note series*. CRC press. <https://doi.org/doi.org/10.1201/9780203971093>
- Boukerche, A., Zheng, L., & Alfandi, O. (2020). Outlier detection: Methods, models, and classification. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53(3), 1-37. <https://doi.org/doi.org/10.1145/3381028>
- Breunig, M. M., Kriegel, H.-P., Ng, R. T., & Sander, J. (2000). LOF: identifying density-based local outliers. Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD. *International Conference on Management of Data*.
- Cohn, T. A., England, J., Berenbrock, C., Mason, R., Stedinger, J., & Lamontagne, J. (2013). A generalized Grubbs-Beck test statistic for detecting multiple potentially influential low outliers in flood series. *Water Resources Research*, 49(8), 5047-5058. <https://doi.org/doi.org/10.1002/wrcr.20392>
- D'Agostino, R. B. (1986). *Goodness-of-fit-techniques* (Vol. 68). CRC press.
- Dave, D., & Varma, T. (2014). A review of various statistical methods for outlier detection. *International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSET)*, 5(2), 137-140.
- Donoho, D. L., & Huber, P. J. (1983). The notion of breakdown point. *A Festschrift for Erich L. Lehmann*, 157-184.
- Fenton, J. D., & Keller, R. J. (2001). The calculation of streamflow from measurements of stage.
- Goldstein, M., & Dengel, A. (2012). Histogram-based outlier score (hbos): A fast unsupervised anomaly detection algorithm. *KI-2012:Poster and Demo Track*, 1, 59-63.
- Grubbs, F. E. (1969). Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, 11(1), 1-21.
- Herschey, R. W. (2008). *Streamflow Measurement*. CRC press.

- Holmström, H., & Fransson, J. E. (2003). Combining remotely sensed optical and radar data in k NN-estimation of forest variables. *Forest Science*, 49(3), 409-418. <https://doi.org/doi.org/10.1093/forests/49.3.409>
- Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H., & Pierrefeu, G. (2018). Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*, 54(3), 1952-1976. <https://doi.org/doi.org/10.1002/2017WR022039>
- Kiani, R. a. M., M. . (2015). A review of outlier detection methods. *International Conference on Research in Science and Technology. 14 December 2015, Kuala Lumpur, Malaysia*. [In Persian]
- Li, Q., Fisher, K., Meng, W., Fang, B., Welsh, E., Haura, E. B., Koomen, J. M., Eschrich, S. A., Fridley, B. L., & Chen, Y. A. (2020). GMSimpute: a generalized two-step Lasso approach to impute missing values in label-free mass spectrum analysis. *Bioinformatics*, 36(1), 257-263. <https://doi.org/doi.org/10.1093/bioinformatics/btz488>
- Maanavi, M., & Roozbeh, M. (2021). Regression Analysis Methods for High-dimensional Data. *Andishe ye Amari*, 25(1), 69-90. [In Persian]
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2019). *Applied Statistics and Probability For Engineers*. John Wiley & sons.
- Naghdi, R., Shayannezhad, M., & Sadati, N. S. (2010). Comparison of different methods for estimating of monthly discharge missing data in Grand Karoon River Basin. [In Persian]
- Nazeri Tahrudi, M. (2014). Compared to the normal mechanism becomes the normal monthly rainfall data from different regions of Iran. *Water and Soil*, 28(2), 365-372. [In Persian]
- Ordooni, M., Memarian, H., Akbari, M., & Pourreza, M. (2021). Evaluation and Comparison of GPM Satellite Precipitation Data with Meteorological Station using Kolmogorov-Smirnov Test. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 9(2), 11-24. [In Persian]
- Poursalehi, F., Shahidi, A., & Khashei Siuki, A. (2019). Comparison of decision tree m5 and k-nearest neighborhood algorithm models in the prediction of monthly precipitation (case study: birjand synoptic station). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(5), 1283-1293. [In Persian]
- Rahmdel, M., Mohamadian, A., Javanshiri, Z., & Sanaeinejad, S. (2021). Exploratory analysis and inhomogeneity study of temperature and rainfall series of meteorological stations in Iran (period 1989-2018). [In Persian]
- Rajabi Jaghargh, M., Mousavi Baygi, S. M., Araghi, S. A., & Jabari Noghabi, H. (2024). Calibration of ERA5 daily precipitation using MLP, D-Tree, and KNN algorithms in Razavi Khorasan province. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(1), 129-147. [In Persian]
- Schafer, J. L., & Graham, J. W. (2002). Missing data: our view of the state of the art. *Psychological Methods*, 7(2), 147.
- Shataee, S., Kalbi, S., Fallah, A., & Pelz, D. (2012). Forest attribute imputation using machine-learning methods and ASTER data: comparison of k-NN, SVR and random forest regression algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 33(19), 6254-6280. <https://doi.org/doi.org/10.1080/01431161.2012.682661>
- Smiti, A. (2020). A critical overview of outlier detection methods. *Computer Science Review*, 38, 100306. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100306>
- Suri, N. M. R., Murty, M. N., & Athithan, G. (2019). *Outlier detection: Techniques and Applications*. Springer. <https://doi.org/doi.org/10.1007/978-3-030-05127-3>
- Tourian, M., Schwatke, C., & Sneeuw, N. (2017). River discharge estimation at daily resolution from satellite altimetry over an entire river basin. *Journal of Hydrology*, 546, 230-247. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.009>
- Umar, N., & Gray, A. (2023). Comparing single and multiple imputation approaches for missing values in univariate and multivariate water level data. *Water*, 15(8), 1519. <https://doi.org/doi.org/10.3390/w15081519>